

Estimacija stanja distributivnih mreža u prisustvu negausovog šuma u merenjima

Stefan Čubonović, Dragan Ćetenović, Aleksandar Ranković

Apstrakt—Cilj ovog rada je da istraži uticaj postojanja negausovog šuma u merenjima na performanse estimatora stanja u distributivnim mrežama. Uticaj je ispitivan na primeru dva različita estimatora stanja: WLS (*Weighted Least-Squares*), koji je zasnovan na primeni metoda minimuma sume otežanih kvadrata odstupanja, i EKF (*Extended Kalman Filter*), koji je zasnovan na primeni Kalmanovog filtra. Performanse svakog od estimatora su poređene za slučaj kada šum merenja podleže Gausovoj ili nekoj od negausovih raspodela verovatnoće, kao što su: Uniformna, Laplasova, Vejbulova i model Gausove smeše sa dve Gausove komponente. Analize su sprovedene na modifikovanom IEEE test sistemu sa 37 čvorova pri različitim pogonskim uslovima, uključujući kvazistacionarni režim, iznenadne promene stanja i loša merenja. Izvedeni su glavni zaključci i predložena su rešenja za prevazilaženje potencijalnih problema u radu estimatora.

Ključne reči — Distributivna mreža, EKF, estimacija stanja, greška merenja, negausov šum, WLS.

I. UVOD

Zadatak estimacije stanja (ES) je da estimira fazore napona čvorova u sistemu pri širokom spektru radnih uslova, uključujući kvazistacionarni režim, iznenadne promene stanja i loša merenja. Dok je ES prenosnih mreža dostigla visok stepen razvoja, ES distributivnih mreža (DM) se još uvek suočava sa brojnim problemima koje je potrebno rešiti imajući u vidu da rezultati ES imaju važnu ulogu pri rekonfiguraciji mreže, Volt/VAR regulaciji, upravljanju distribuiranom proizvodnjom, itd. Netačni rezultati ES mogu dovesti do pogrešnih upravljačkih odluka. Intenzivna integracija varijabilnih obnovljivih izvora u DM dovodi do većih fluktuacija radne tačke sistema. Prisustvo loših merenja je takodje problem ES u DM, posebno zbog nedostatka telemetrije u ovim mrežama. Nedostatak telemetrije može dovesti do gubitka opservabilnosti DM, čineći ES izvodljivom samo u opservabilnim ostrvima. Na kraju, karakteristike šuma merenja obično nisu precizno poznate, zbog čega se za šum merenja često usvajaju odgovarajuće pretpostavke. Ovaj rad istražuje kako šum merenja utiče na rad estimatora stanja u DM, posebno kada šum ne podleže najčešće pretpostavljanoj Gausovoj raspodeli verovatnoće.

Stefan Čubonović – Fakultet tehničkih nauka u Čačku, Univerziteta u Kragujevcu, Svetog Save 65, 32000 Čačak, Srbija (e-mail: stefan.cubonovic@ftn.kg.ac.rs).

Dragan Ćetenović – Fakultet tehničkih nauka u Čačku, Univerziteta u Kragujevcu, Svetog Save 65, 32000 Čačak, Srbija (e-mail: dragan.cetenovic@ftn.kg.ac.rs).

Aleksandar Ranković – Fakultet tehničkih nauka u Čačku, Univerziteta u Kragujevcu, Svetog Save 65, 32000 Čačak, Srbija (e-mail: aleksandar.rankovic@ftn.kg.ac.rs).

Najčešća pretpostavka u ES je da su greške merenja nezavisne, identično raspodeljene i prate Gausovu raspodelu sa matematičkim očekivanjem jednakim nuli. U praksi, šum telemetrisanih merenja ne mora nužno da podleže Gausovoj raspodeli [1]. Statističke karakteristike šuma telemetrisanih merenja zavise od elektromagnetskih smetnji u komunikacionim kanalima i drugih izvora komunikacionih smetnji koje mogu poticati od prirodnih uzroka (kao što su loši vremenski uslovi) ili veštačkih uzroka (kao što su tehnologije zasnovane na inverterima) [2, 3]. Posledično, šum merenja kao slučajna promenljiva može odstupati od Gausove raspodeli verovatnoće. Zbog toga je neophodno ispitati performanse estimatora stanja u slučaju da šum merenja ne podleže Gausovoj raspodeli.

U DM postoji ograničen broj mernih uređaja za prikupljanje merenja za potrebe ES. Kako bi se nadomestio nedostatak telemetrisanih merenja u DM i popravila redundansa merenja, često se koriste pseudo i/ili virtualna merenja. Pseudo merenja predstavljaju snage injektiranja koje se najčešće dobijaju iz tipskih normalizovanih dnevnih dijagrama opterećenja potrošača ili proizvodnje distribuiranih generatora (DG). Kao takva, pseudo merenja su manje tačna od telemetrisanih merenja i mogu sadržati greške (šum) i do 50%, čime se smanjuje tačnost ES [4-6]. Greške pseudo merenja ne moraju pratiti Gausovu raspodelu. Virtualna merenja predstavljaju nulta injektiranja snage u čvorovima bez priključenih potrošača i/ili DG-a. Za razliku od pseudo merenja, ona su apsolutno tačna, pa poboljšavaju i tačnost ES.

Da bi rešili problem negausovog šuma u pseudo merenjima, Bajesov estimator je predložen u [7]. Bajesov estimator u [8] koristi predviđene informacije i merenja tokova snaga. Transformisani metod maksimalne verodostojnosti [9] i dve robusne metode zasnovane na konvencionalnom filtru čestica [10] korišćene su za ES i detekciju loših podataka u DM kako bi se efikasno rešio problem negausovog šuma u merenjima. Analiza loših podataka, zasnovana na testu najvećeg normalizovanog reziduala, korišćena je za detekciju, identifikaciju i korekciju/eliminisanje loših merenja u prisustvu Gausovog i negausovog šuma [11]. U [12], autori su istraživali kako negausov šum merenja utiče na raspodelu verovatnoće vektora stanja linearnog Kalmanovog filtra; matematičko očekivanje i varijansa su korišćeni se kao mera odstupanja negausove raspodele od Gausove. Međutim, u literaturi još uvek nedostaje rad koji istražuje kako različite negausove raspodele verovatnoće šuma merenja utiču na performanse najčešće korišćenih estimatora stanja u različitim radnim uslovima, sumira sve uticaje na jednom mestu i daje generalne zaključke.

U ovom radu su testirane performanse WLS i EKF

estimatora stanja u uslovima u kojima šum u telemetrisanim i pseudo merenjima ne podleže Gausovoj raspodeli. U tu svrhu korišćene se različite negausove gustine raspodele verovatnoće, i to: Uniformna, Laplasova, Vejbulova i model Gausove smeše sa dve Gausove komponente. Potom su performanse estimatora stanja poređene sa njihovim performansama u uslovima u kojima šum merenja prati Gausovu raspodelu. Poređenje je izvršeno u različitim radnim uslovima, uključujući kvazistacionarni radni režim, iznenadne promene stanja i prisustvo loših podataka.

Struktura preostalih delova rada je organizovana na sledeći način. U poglavlju II su predstavljena dva estimatora stanja: WLS i EKF. U poglavlju III su opsiane različite vrste negausovih gustina raspodele verovatnoće. U poglavlju IV su sprovedene simulacije i komparativna analiza na modifikovanom IEEE test sistemu sa 37 čvorova. Na kraju, zaključci su formulisani u poglavlju V.

II. METODE ESTIMACIJE STANJA

Jednačina promene stanja u sistemu opisuje kako se radna tačka sistema menja u vremenu i matematički se može izraziti na sledeći način [13]:

$$\mathbf{x}^{(j+1)} = \mathbf{F}^{(j)} \mathbf{x}^{(j)} + \mathbf{g}^{(j)} + \mathbf{w}^{(j)}, \quad (1)$$

gde su:

$\mathbf{x} = [\mathbf{V}^T, \boldsymbol{\theta}^T]^T$ – $n \times 1$ dimenzioni vektor stanja (modula i faznih stavova napona čvorova);

\mathbf{F} – $n \times n$ dimenziona tranziciona matrica koja opisuje promenu stanja između dva uzastopna vremenska trenutka;

\mathbf{g} – $n \times 1$ dimenzioni vektor koji uzima u obzir trend promene stanja u sistemu;

\mathbf{w} – $n \times 1$ dimenzioni vektor grešaka modela promene stanja;

j – vremenski trenutak;

n – broj promenljivih stanja.

Veza između vektora merenja i vektora promenljivih stanja u trenutku j može se opisati sledećom jednačinom [14]:

$$z^{(j)} = \mathbf{h}(\mathbf{x}^{(j)}) + e^{(j)}, \quad (2)$$

gde su:

\mathbf{z} – $m \times 1$ dimenzioni vektor merenja;

\mathbf{h} – $m \times 1$ dimenziona nelinearna vektorska funkcija merenja;

\mathbf{e} – $m \times 1$ dimenzioni vektor grešaka merenja;

m – ukupan broj merenja u sistemu, pri čemu mora važiti uslov $m \geq n$ kako bi se obezbedila opservabilnost sistema.

U Tabeli 1 dat je opis primenjenih metoda ES. Oznake iz te tabele imaju sledeće značenje:

\mathbf{R} – matrica kovarijansi grešaka merenja;

\mathbf{x}_- – $n \times 1$ dimenzioni vektor predviđenog stanja;

\mathbf{P}_- – $n \times n$ dimenziona matrica kovarijansi predviđenog vektora stanja.

TABELA I
METODI ESTIMACIJE STANJA

Metod ES	Kratak opis metode
WLS	<ul style="list-style-type: none"> ES je zasnovana na minimizaciji sume otežanih kvadrata reziduala merenja [16]. Funkcija cilja: $J(\mathbf{x}) = [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})]^T \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})]$ Cilj optimizacije je pronaći vektor stanja \mathbf{x} koji će minimizirati funkciju cilja, najčešće upotrebom iterativnog Njutn-Rapsnovog postupka [16].
EKF	<ul style="list-style-type: none"> Funkcija cilja je proširena dodatnim članom koji predstavlja zbir otežanih kvadrata razlika između promenljivih stanja i njihovih predviđenih vrednosti [13]: $J(\mathbf{x}) = [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})]^T \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})] + [\mathbf{x} - \mathbf{x}_-]^T \mathbf{P}_-^{-1} [\mathbf{x} - \mathbf{x}_-]$ Cilj optimizacije je pronaći vektor stanja \mathbf{x} koji će minimizirati funkciju cilja. S obzirom da je jednačina merenja nelinearna, do rešenja se dolazi upotrebom proširenog Kalmanovog filtra [13].

III. MODELOVANJE ŠUMA MERENJA

Prethodno pomenute metode ES se obično zasnivaju na pretpostavci da šum merenja prati Gausovu raspodelu, odnosno da je funkcija gustine raspodele verovatnoće data jednačinom (3). Međutim, ova pretpostavka nije uvek zadovoljena u praksi. Da bi se istražilo kako negausov šum merenja utiče na performanse obe metode ES, šumu merenja su dodeljivane različite negausove funkcije gustine raspodele verovatnoće koje se mogu izraziti jednačinama (4)-(7). Za svaku od pomenutih raspodela verovatnoće sa parametrima datim u Tabeli 2 [11], na Sl. 1 su prikazani histogrami generisanih uzoraka.

- Gausova raspodela:

$$\mathcal{N}(e_i; \mu_i, \sigma_i) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{e_i - \mu_i}{\sigma_i}\right)^2\right); \quad -\infty < e_i < \infty, \quad (3)$$

- Uniformna raspodela:

$$\mathcal{U}(e_i; u_i, v_i) = \frac{1}{(v_i - u_i)}; \quad u_i < e_i < v_i, \quad (4)$$

- Laplasova raspodela:

$$\mathcal{L}(e_i; \delta_i, d_i) = \frac{1}{2d_i} \exp\left(-\frac{|e_i - \delta_i|}{d_i}\right); \quad -\infty < e_i < \infty, \quad (5)$$

- Vejbulova raspodela:

$$\mathcal{W}(e_i; d_i, c_i) = \frac{c_i}{d_i} \left(\frac{e_i}{d_i}\right)^{c_i-1} \exp\left(-\frac{e_i}{d_i}\right); \quad e_i \geq 0, \quad (6)$$

- Gausova smeša sa dve Gausove komponente:

$$\mathcal{N}_{mix}(e_i; w_i^1, \mu_i^1, \sigma_i^1, w_i^2, \mu_i^2, \sigma_i^2) = w_i^1 \mathcal{N}(e_i; \mu_i^1, \sigma_i^1) + w_i^2 \mathcal{N}(e_i; \mu_i^2, \sigma_i^2); \quad -\infty < e_i < \infty. \quad (7)$$

Oznake u (3) - (7) imaju sledeće značenje:

e_i – greška i -tog merenja;

μ_i – očekivana vrednost (matematičko očekivanje);

σ_i – standardna devijacija;

u_i, v_i – donja i gornja granica opsega;

δ_i – parametar lokacije;

d_i – parametar skaliranja;

c_i – parametar oblika;

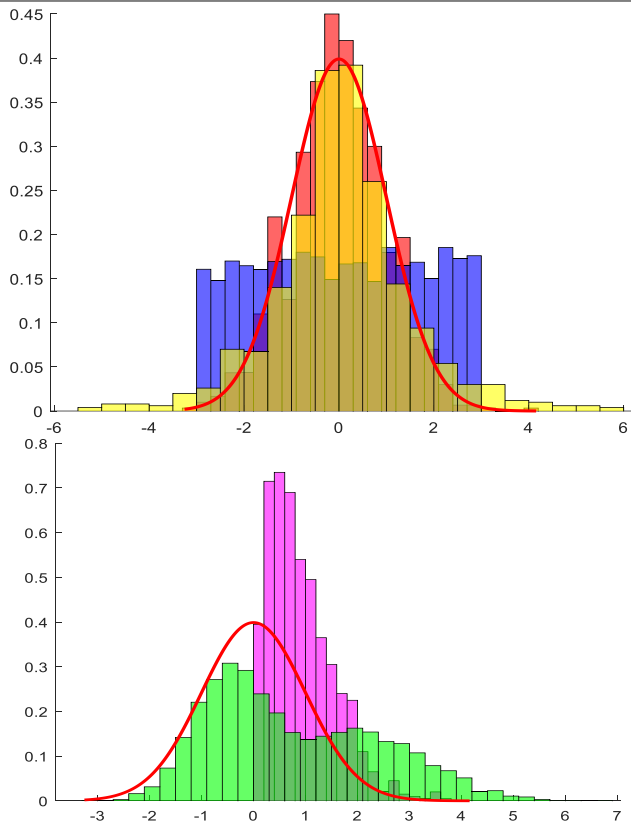
$w_i', w_i'', \mu_i', \mu_i'', \sigma_i', \sigma_i''$ – težinski faktori, očekivane vrednosti i standardne devijacije funkcije raspodele Gausove smeše.

TABELA II
VREDNOSTI PARAMETARA ZA RAZLIČITE FUNKCIJE RASPODELE
VEROVATNOĆE

Raspodela	Parametri funkcije raspodele
\mathcal{N}	$\mu_i=0, \sigma_i=1$
\mathcal{U}	$u_i=-3, v_i=3$
\mathcal{L}	$\delta_i=0, d_i=1$
\mathcal{W}	$d_i=1, c_i=1,5$
\mathcal{N}_{mix}	$w_i'=0,7, \mu_i'=-0,5, \sigma_i'=0,7; w_i''=0,3, \mu_i''=2, \sigma_i''=1,3$

Legenda slike 1:

● - \mathcal{N} ◆ - \mathcal{U} ▲ - \mathcal{L} ★ - \mathcal{W} ■ - \mathcal{N}_{mix}

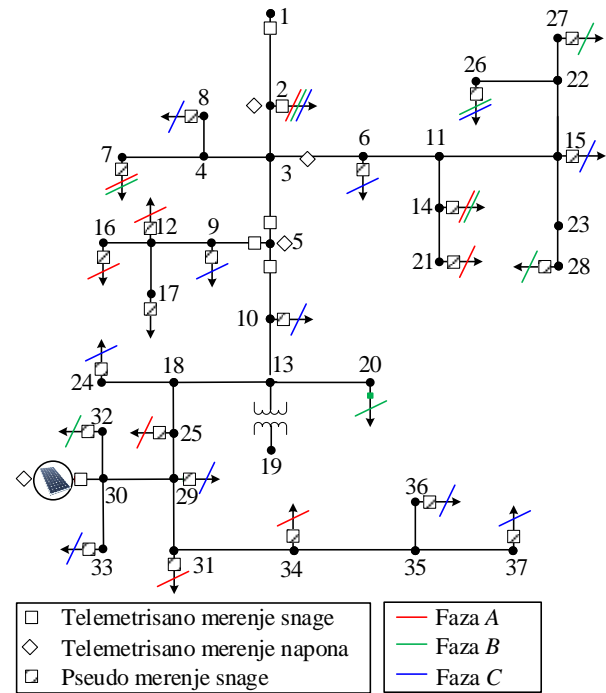


Sl. 1. Histogrami generisanih podataka funkcija negausovih gustina raspodele verovatnoće u poređenju sa funkcijom gustine verovatnoće standardne Gausove raspodele (crvena kriva).

IV. ANALIZA REZULTATA

U ovom radu je ispitan uticaj negausove greške merenja na rezultate ES sprovedene na modifikovanom IEEE distributivnom sistemu sa 37 čvorova. Modifikacija sistema je izvršena dodavanjem PV generatora nazivne snage 900 kW u čvor 30. Na Sl. 2 je prikazan modifikovani test sistem. Šum merenja je modelovan na način objašnjen u poglavlju III. Telemetrisana i pseudo merenja imaju tačnost 3% i 50%, respektivno, dok standardna devijacija virtuelnih merenja iznosi 10^{-5} .

Stanje je estimirano pomoću WLS i EKF estimatora. Jedna simulacija pokriva period od 24 časa, što sa vremenskom diskretizacijom od jednog minuta znači da je ES izvršena ukupno 1440 puta u toku jedne simulacije. Kao pokazatelji tačnosti rezultata ES korišćene su srednja apsolutna greška (MAE - Mean Absolute Error) i prosečna srednja apsolutna greška (AMAE - Average Mean Absolute Error) koje su računane prema jednačinama (8) - (11). Performanse dva estimatora stanja su poređene pri različitim radnim uslovima: kvazistacionarnom radnom režimu, nagloj promeni stanja i u prisustvu loših merenja.



Sl. 2. Topologija mreže i konfiguracija merenja modifikovanog IEEE test sistema sa 37 čvorova.

$$\xi_V^{(j),MAE} = \frac{1}{n_V} \sum_{l=1}^{n_V} |V_{l+}^{(j)} - V_l^{(j),true}|; \quad (8)$$

$$\xi_\theta^{(j),MAE} = \frac{1}{n_\theta} \sum_{l=1}^{n_\theta} |\theta_{l+}^{(j)} - \theta_l^{(j),true}|; \quad (9)$$

$$\xi_V^{AMAE} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \xi_V^{(j),MAE}; \quad (10)$$

$$\xi_\theta^{AMAE} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \xi_\theta^{(j),MAE}. \quad (11)$$

Oznake u prethodnim jednačinama imaju sledeće značenje:

n_v – broj elemenata u vektoru modula napona \mathbf{V} ;

n_θ – broj elemenata u vektoru faznih stavova napona θ ;

$V_{l+}^{(j)}$ – estimirana vrednost l -tog elementa vektora modula napona u j -tom vremenskom trenutku;

$V_l^{(j),true}$ – tačna vrednost l -tog elementa vektora modula napona u j -tom vremenskom trenutku;

$\theta_{l+}^{(j)}$ – estimirana vrednost l -tog elementa vektora faznih stavova napona u j -tom vremenskom trenutku;

$\theta_l^{(j),true}$ – tačna vrednost l -tog elementa vektora faznih stavova napona u j -tom vremenskom trenutku;

N – ukupan broj vremenskih trenutaka tokom posmatranog perioda simulacije.

A. Kvazistacionarni radni režimu

Da bi se simulirale spore promene stanju u sistemu, odgovarajućim čvorovima sistema su dodeljeni normalizovani dnevni dijagrami opterećenja/proizvodnje. Spore promene u potrošnji i distribuiranoj proizvodnji, okarakterisane dnevnim dijagramima, dovode do sporih promena u stanju sistema. AMAE greška estimacije na modulima napona i faznim stavovima napona izračunata je za slučaj svake od raspodela verovatnoće šuma merenja. Vrednosti ove greške prikazane su u Tabeli 3.

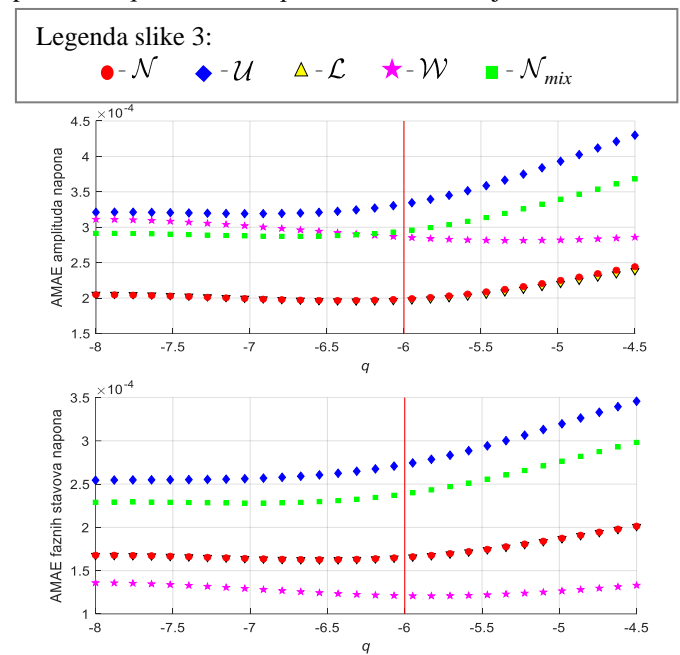
TABELA III
AMAЕ GREŠKA ESTIMACIJE ZA RAZLIČITE FUNKCIJE GUSTINE RASPODELE
VEROVATNOĆE ŠUMA MERENJA

Metod Raspodela	WLS		EKF	
	$\xi_{\mathbf{V}}^{AMAЕ}$ [10^{-4} p.u.]	$\xi_{\theta}^{AMAЕ}$ [10^{-4} rad]	$\xi_{\mathbf{V}}^{AMAЕ}$ [10^{-4} p.u.]	$\xi_{\theta}^{AMAЕ}$ [10^{-4} rad]
\mathcal{N}	2,74	2,22	1,80	1,50
\mathcal{U}	4,79	3,80	3,15	2,59
\mathcal{L}	2,65	2,21	1,79	1,51
\mathcal{W}	2,91	1,42	2,65	1,04
\mathcal{N}_{mix}	4,08	3,27	2,77	2,25

Matricom kovarijansi \mathbf{Q} se modeluje greška modela (1). Greška modela (1) zavisi od volatilnosti potrošnje i/ili distribuirane proizvodnje, pa izbor matrice \mathbf{Q} u opštem slučaju nije jednostavan. Međutim, veći deo vremena sistem radi u kvazistacionarnom režimu koji je okarakterisan gotovo konstantnom greškom u modelu (1) [17]. Ako se matrica \mathbf{Q} izrazi u parametarskom obliku kao $\mathbf{Q}=10^q \mathbf{I}$, to praktično znači da se njen parametar q može usvojiti kao vremenski nepromenljiv tokom rada u kvazistacionarnom režimu. Parametar q se podešava na osnovu *offline* analize kvazistacionarnog radnog režima i to kao vrednost koja minimizira AMAE. Ovako odabrana vrednost parametra q

daje tačne rezultate ES tokom rada u kvazistacionarnom režimu. Ovaj postupak je demonstriran u [18] uz pretpostavku da šum merenja podleže Gausovoj raspodeli. U ovom radu korišćen je isti postupak, s tom razlikom što šum merenja u simulacijama ne podleže Gausovoj raspodeli. Ovo je urađeno kako bi se proverilo da li statističke karakteristike šuma merenja imaju uticaj na optimalni izbor parametra q . Rezultati simulacija su prikazani na Sl. 3.

Na osnovu Sl. 3 sledi da je osetljivost greške $\xi_{\mathbf{V}}^{AMAЕ}$ i $\xi_{\theta}^{AMAЕ}$ na promene parametra q slična pri Gausovoj, Uniformnoj, Laplasovoj, Vejbulovoj i raspodelu Gausove smeše. Povećanjem parametra q iznad vrednosti -6 (crvena linija) primećuje se porast greške ($\xi_{\mathbf{V}}^{AMAЕ}$ i $\xi_{\theta}^{AMAЕ}$). Smanjenjem njegove vrednosti ispod -6, greška estimacije dostiže ustaljenu vrednost. Može se zaključiti da izbor parametra q ne zavisi od prirode šuma merenja.



Sl. 3. Osetljivost greške estimacije na promene parametra q u EKF metodi.

B. Nagla promena stanja

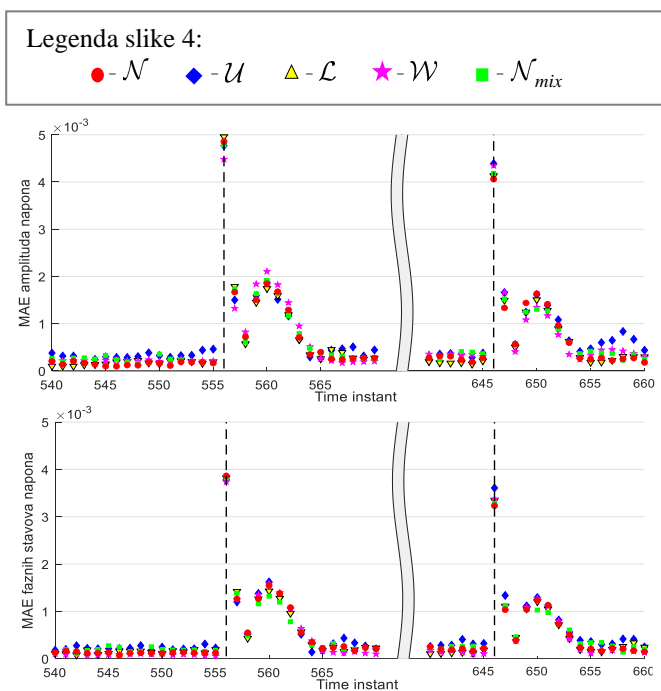
Nagla promena stanja je izazvana naglom promenom snage injeckiranja u čvoru 30. U trenutku $j=556$, PV generator je isključen iz mreže. Neposredno pre isključenja, PV generator je radio sa svojom nazivnom snagom. U trenutku $j=646$, PV generator je ponovo priključen na mrežu. Nakon ponovnog priključenja, PV generator radi sa 85% svoje nazivne snage usled usled slabije iradijanse. MAE greška estimacije je računata za module i faze stavove napona u svakom trenutku j tokom simulacionog perioda, za slučajeve Gausovog i negausovog šuma merenja. Rezultati EKF estimatora su prikazani na Sl. 4. Trenuci u kojima dolazi do nagle promene stanja su označeni isprekidanim linijama.

Kao što se može videti sa Sl. 4, kada dođe do nagle promene u odatoj snazi elektrane, greške estimacije na modulima i faznim stavovima napona ($\xi_{\mathbf{V}}^{(556),MAЕ}$ i $\xi_{\theta}^{(646),MAЕ}$) naglo rastu bez obzira na prirodu šuma merenja. To je zato što

matrica \mathbf{Q} nije prilagođena nagloj promeni stanja u sistema, već ostaje konstantna i jednaka matrici optimalnoj za kvazistacionarni radni režim. Poredeći rezultate u trenucima $j=556$ i $j=646$ može se primetiti da je greška estimacije veća kada je promena u snazi injektiranja veća (MAE za $j=556$ ima veću vrednost od MAE za $j=646$). Međutim, uticaj na grešku estimacije je isti u slučajevima Gausovog i negausovog šuma merenja. Stoga su mere koje treba preduzeti za smanjenje greške estimacije u slučaju negausove raspodele iste kao i u slučaju kada šum merenja prati Gausovu raspodelu.

WLS estimator je neosetljiv na nagle promene stanja u sistemu jer ne koristi model (1). U trenutku nagle promene proizvodnje WLS estimator zadržava istu tačnost kao u kvazistacionarnom režimu bez obzira na prirodu šuma u merenjima.

Može se zaključiti da su performanse oba estimatora pri naglim promenama stanja nezavisne od statističkih karakteristika šuma merenja.

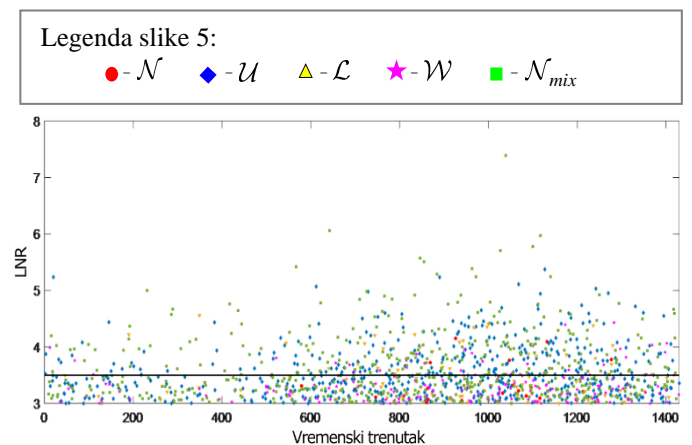


Sl. 4. MAE greška estimacije na modulima i faznim stavovima napona čvorova dobijena pomoću EKF metode u prisustvu Gausovog i negausovih šuma merenja.

C. Loša merenja

Na osnovu rezultata estimacije stanja sprovodi se detekcija loših merenja. Da bi se analizirao uticaj prirode šuma merenja na rad detektora loših merenja, WLS estimator je nadograđen najčešće korišćenim metodom za detekciju loših merenja: testom najvećeg normalizovanog reziduala (*Largest Normalized Residual* - LNR). LNR test se zasniva na pronalaženju merenja sa najvećom vrednošću normalizovanog reziduala i poređenju te vrednosti sa unapred definisanim pragom [14]. Ako je najveći normalizovani residual veći od unapred definisanog praga, prisustvo lošeg merenja je detektovano. U suprotnom, nema loših podataka u skupu merenja. Treba napomenuti da izvođenje LNR testa ima smisla samo ako se sprovodi na telemetrisanim merenjima.

Uzimajući u obzir statističke karakteristike Gausove raspodele, prag u LNR testu se često podešava na vrednost $t=3$ [14, 19]. Kako bi se sprečilo da detektor lažno odreaguje u odsustvu loših merenja, prag se može podesiti na nešto višu vrednost od 3. Međutim, prag ne treba podesiti ni suviše visoko jer tada postoji rizik da detektor ne odreaguje u prisustvu lošeg merenja. U ovom radu, prag je podešen na $t=3,5$ (označen crnom linijom na Sl. 5). Koristeći ovakvo podešenje, analiziran je rad LNR testa u odsustvu loših merenja i to u slučajevima kada šum merenja podleže Gausovoj i negausovoj raspodeli. Rezultati su prikazani na Sl. 5. Može se primetiti da su, u slučaju kada šum merenja podleže Gausovoj raspodeli, vrednosti normalizovanih reziduala skoro uvek ispod definisanog praga. U slučaju negausove raspodele, vrednosti normalizovanih reziduala često prelaze prag uzrokujući na taj način veliki broj lažnih reagovanja detektora, što je posebno izraženo u slučaju Uniformne raspodele i raspodele Gausove smeše. Razlog za to je što negausova raspodela može imati dugačke i/ili debele repove. Karakteristike repa raspodele zavise od tipa i parametara specifične negausove raspodele verovatnoće. Unapred određeni prag $t=3,5$ za detekciju loših merenja može se smatrati prikladnim u slučaju Gausove raspodele šuma merenja, ali je neophodno usvojiti novo podešenje ukoliko šum merenja podleže negausovoj raspodeli.



Sl. 5. LNR test u odsustvu loših merenja za slučaj kada šum merenja podleže različitim raspodelama verovatnoće.

V. ZAKLJUČAK

U ovom radu je analiziran uticaj negausovog šuma merenja na performanse estimatora stanja u distributivnim mrežama. Analize su sprovedene upotrebom dva različita estimatora stanja – WLS i EKF. Uticaj je analiziran sa aspekta tačnosti estimacije, optimalnog podešavanja matrice kovarijansi \mathbf{Q} i performansi tradicionalnog detektora loših merenja. Analize su sprovedene koristeći Uniformnu, Laplasovu, Vejbulovu i raspodelu Gausove smeše kao primere negausovih raspodela verovatnoće. Radi poređenja, rezultati estimacije stanja dobijeni u slučaju kada šum merenja prati Gausovu raspodelu su korišćeni kao referentni. U kvazistacionarnom režimu rada, negausov šum merenja može dovesti do izvesnog porasta greške estimacije. Kod EKF estimatora, negausov šum

merenja generalno ne utiče na optimalano podešenje matrice kovarijansi Q za kvazistacionarno stanje. U slučaju naglih promena stanja, statističke karakteristike šuma merenja nemaju uticaja na performanse nijednog od korišćenih estimatora stanja. Međutim, negausov šum merenja može značajno uticati na performanse tradicionalnih detektora loših merenja, poput LNR testa, zahtevajući nova podešenja za prag detekcije.

ZAHVALNICA

Istraživanja prezentovana u ovom radu su delimično finansirana sredstvima Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija RS, ugovor br. 451-03-66/2024-03/200132 čiji je realizator Fakultet tehničkih nauka u Čačku - Univerziteta u Kragujevcu.

LITERATURA

- [1] X. Ji, Z. Yin, Y. Zhang, M. Wang, X. Zhang, C. Zhang, D. Wang: "Real-time Robust Forecasting-Aided State Estimation of Power System Based on Data-Driven Models", *Electric Power Systems Research*, Vol, February 2021, p. 106412.
- [2] H. Dehra: "Characterization of Noise in Power Systems", PEEIC, Greater Noida, India, April 2018, pp. 320-329.
- [3] M. Brown, M. Biswal, S. Brahma, S.J. Ranade, H. Cao: "Characterizing and quantifying noise in PMU data", PESGM, Boston, 2016, pp. 1-5.
- [4] J. Liu, J. Tang, F. Ponci, A. Monti, C. Muscas, P. A. Pegoaro: "Trade-offs in PMU deployment for state estimation in active distribution grids", *IEEE Trans Smart Grid*, June 2012, pp. 915-924.
- [5] P. A. Pegoraro, J. Tang, J. Liu, F. Ponci, A. Monti, C. Muscas: "PMU and smart metering deployment for state estimation in active distribution grids", *ENERGYCON*, Italy, September 2012, pp. 873-878.
- [6] M. Pau, P. A. Pegoraro, S. Sulis: "WLS distribution system state estimator based on voltages or branch currents: Accuracy and performance comparison", *I2MTC*, USA, May 2013, pp. 493-498.
- [7] P. A. Pegoraro, M. Pao, F. Ponci, A. Monti, A. Angioni, C. Muscas, S. Sulis: "Bayesian Distribution System State Estimation in Presence of Non-Gaussian Pseudo-measurements", *IEEE International Workshop on AMPS*, Germany, September 2016, pp. 1-6.
- [8] P. A. Pegoraro, A. Angioni, M. Pao, F. Ponci, A. Monti, C. Muscas, S. Sulis et al: "Bayesian Approach for Distribution System State Estimation with non-Gaussian Uncertainty Models", *IEEE TIM*, vol. 66, no. 11, November 2017, pp. 2957-2966.
- [9] R. Mínguez, A. J. Conejo, A. S. Hadi: "Non Gaussian State Estimation in Power Systems", *Advances in Mathematical and Statistical Modeling. Statistics for Industry and Technology*, Birkhäuser Boston, 2008, pp. 141-156.
- [10] Q. Shi, M. Liu, L. Hang: "A Novel Distribution System State Estimator Based on Robust cubature Particle Filter Used for Non-Gaussian Noise and Bad Data Scenarios", *IET Gener., Transm. & Distr*, vol. 16, no. 7, 2022 pp. 1385-1399.
- [11] R. Martínez-Parralesa, C.R. Fuerte-Esquivela, B.A. Alcaide-Morenob: "Analysis of Bad Data in Power System State Estimation Under Non-Gaussian Measurement Noise", *EPSR*, vol. 186, Sep. 2020, pp. 1-13.
- [12] A. Tollkühn, F. Particke and J. Thielecke: "Gaussian State Estimation with Non-Gaussian Measurement Noise", *SDF*, Germany, 2018, pp. 1-5.
- [13] A. M. Leite da Silva, M. B. Do Coutto Filho, J. F. de Queiroz: "State forecasting in electric power systems", *IEE Proceedings C*, vol. 130, September. 1983, pp. 237-244.
- [14] A. Abur and A.G. Exposito: "Power System State Estimation: Theory and Implementation", Marcel Dekker, NY, USA, 2004.
- [15] F. C. Schweppe, J. Wildes, "Power System Static-State Estimation, Part I: Exact Model", *TPWRS*, vol. Pas-89, no. 1, Jan. 1970, pp. 120-125.
- [16] A. Monticelli: "State Estimation in Electric Power Systems: A Generalized Approach", Kluwer Academic Publishers, Boston, 1999.
- [17] A. M. Leite da Silva, M. B. Do Coutto Filho, J. M. C. Cantera: "An efficient dynamic state estimation algorithm including bad data processing", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 2, No. 4, November 1987, pp. 1050-1058.
- [18] D. N. Četenović, A. M. Ranković: "Optimal parameterization of Kalman filter based three-phase dynamic state estimator for active distribution networks", *JEPE*, vol. 101, October 2018, pp. 472-481.
- [19] N. Veerakumar, D. Četenović, K. Kongurai, M. Popov, A. Jongepier, V. Terzija: "PMU-based Real-time Distribution System State Estimation Considering Anomaly Detection, Discrimination and Identification", *JEPE*, vol. 148, June 2023, pp. 108916.

ABSTRACT

The aim of this paper is to investigate the influence of the presence of non-Gaussian measurements noise on the performance of state estimators in distribution networks. The impact is examined using two different state estimators as examples: WLS (Weighted Least-Squares), which is based on the application of the method of minimum weighted sum of squared deviations, and EKF (Extended Kalman Filter), which is based on the application of the Kalman filter. The performance of each estimator is compared for cases where measurement noise follows Gaussian or one of several non-Gaussian probability distributions, such as Uniform, Laplace, Weibull and a Gaussian mixture model with two Gaussian components. Analyses are conducted on a modified IEEE test system with 37 nodes under various operating conditions, including quasi-steady state, sudden state changes and bad data. Main conclusions were drawn and solutions are proposed to overcome potential issues in the operation of the state estimators.

State Estimation of distribution networks in the presence of non-Gaussian measurement noise

Stefan Čubonović, Dragan Četenović, Aleksandar Ranković